



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## CEEH Videnskabelig rapport nr. 10

*CEEH's beregning af helbredsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens fremtidsforløb*

Karlsson, K.; Ystanes Føyn, T. H.; Gregg, J. S.; Kaspersen, P.S.; Brandt, Jørgen; Frohn, L. M.; Mathiesen, Brian Vad

*Publication date:*  
2011

*Document Version*  
Tidlig version også kaldet pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Karlsson, K., Ystanes Føyn, T. H., Gregg, J. S., Kaspersen, P. S., Brandt, J., Frohn, L. M., & Mathiesen, B. V. (2011). *CEEH Videnskabelig rapport nr. 10: CEEH's beregning af helbredsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens fremtidsforløb*. CEEH - Center for Energy, Environment and Health. Centre for Energy, Environment and Health Report series Nr. 10

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



***Centre for  
Energy, Environment and Health  
Report series***

ISSN 1904-7495

## **CEEH Videnskabelig rapport nr. 10**

**CEEH's beregning af helbredsomkostninger fra  
luftforurening i Klimakommissionens fremtidsforløb**



**Roskilde 2011**

# Kolofon

**Serie titel:**

Centre for Energy, Environment and Health Report Series

**Titel:**

CEEH rapport nr. 10:

CEEH's beregning af sundhedsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens fremtidsforløb

**Forfattere:**

K. Karlsson, T. H. Ystanes Føyn, J. S. Gregg og P.S. Kaspersen : Risø DTU

J. Brandt og L. M. Frohn : Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet

B. V. Mathiesen : Aalborg universitet

**Andre bidragsydere:**

Eigil Kaas<sup>1</sup>, Torben Sigsgaard<sup>5</sup>, Alexander Baklanov<sup>2</sup>, Roman Nuterman<sup>2</sup>, Jakob Bønløkke<sup>5</sup>, Henrik Brønnum-Hansen<sup>3</sup>, Jan Sørensen<sup>4</sup>, Marie-Louise Siggaard-Andersen<sup>1</sup>, Per Ponsaing<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Niels Bohr Institutet – Københavns Universitet

<sup>2</sup>Danmarks Meteorologiske Institut

<sup>3</sup>Statens Institut for Folkesundhed – Syd Dansk Universitet

<sup>4</sup>Center for Anvendt Sundhedstjenesteforskning og Teknologivurdering - Syd Dansk Universitet

<sup>5</sup>Institut for Folkesundhed – Aarhus Universitet

<sup>6</sup>DONG Energy

**Ansvarlig institution:**

Risø Nationallaboratoriet for bæredygtig energi, Danmarks Tekniske Universitet  
Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde

**Sprog:** Dansk

**Nøgleord:** CEEH, Luftforurening, energisystemer, fremtidsforløb, scenarier, Klimakommissionen.

**Url:** [www.cee.dk/CEEH\\_Reports/Rapport\\_10](http://www.cee.dk/CEEH_Reports/Rapport_10)

**ISSN:** ISSN 1904-7495

**Version:** Final

**Website:** [www.cee.dk](http://www.cee.dk)

**Copyright:** Brug af indholdet i denne rapport bør citeres som:

K. Karlsson et al., 2011: CEEH's beregning af sundhedsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens fremtidsforløb, CEEH Scientific Report No 10, Centre for Energy, Environment and Health Report series, november 2011, pp. 24.

[http://www.cee.dk/CEEH\\_Reports/Rapport\\_10/CEEH\\_Rapport\\_10.pdf](http://www.cee.dk/CEEH_Reports/Rapport_10/CEEH_Rapport_10.pdf)

## Indhold:

Indledning .....	4
Helbredsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens scenarier – Sammenfatning .....	5
Metode til bestemmelse af helbredsomkostninger fra luftforurening .....	7
Beregning af helbredsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens fremtidsforløb .....	8
Klimakommissionens forløb.....	9
Energiforbrug i Klimakommissionens reference og fremtidsforløb .....	10
Forløb A.....	10
Forløb U.....	13
Andre emissioner fra Klimakommissionens reference og fremtidsforløb.....	15
Forløb A.....	15
Forløb U.....	16
Helbredsomkostninger .....	17
Forløb A.....	17
Forløb U.....	17
Konklusion og forbehold .....	18
Referencer.....	20
Appendiks – helbredsomkostninger fordelt på forskellige sektorer og teknologier .....	21
Resultater fra Klimakommissionens Forløb A.....	21
Resultater fra Klimakommissionens Forløb U.....	22

## Indledning

Klimakommissionen præsenterede deres rapport "Grøn energi – vejen mod et dansk energisystem uden fossile brændsler" i september 2010 (Klimakommissionen 2010), hvor de viser, hvorledes det danske energisystem kan gøres uafhængigt af fossile brændsler inden 2050. Bag ved hovedrapporten ligger en lang række detaljerede scenarieberegninger, der også er anvendt som udgangspunkt for den forrige regerings energistrategi, som blev præsenteret den 24. februar 2011.

Som led i Klimakommissionens arbejde blev der også lavet detaljerede økonomiske analyser, både teknisk-økonomiske beregninger og vurderinger af makroøkonomiske effekter. Alle omkostninger og gevinster for samfundet blev dog ikke opgjort. Eksternaliteter såsom helbredseffekter, skade på natur, nedbrydning af bygninger mv. er ikke inddraget i Klimakommissionens økonomiske vurderinger.

Motivationen for denne rapport er at udnytte den viden om omkostninger ved helbredseffekter fra luftforurening, der er opnået i det danske tværfaglige forskningscenter Center for Energi, Miljø og Helbred (CEEH), til at vurdere hvor meget det danske samfund kan spare i helbredsomkostninger ved at omstille til et energisystem uafhængigt af fossile brændsler.

CEEH er et strategisk forskningscenter i Energi, Miljø og Helbred påbegyndt januar 2007. Centret er et samarbejde mellem de videnskabelige discipliner: atmosfærefysik og -kemi, sundhedsvidenskab og energisystemanalyse. Modelværktøjer fra disse discipliner danner grundlag for en optimering af Danmarks fremtidige energiforsyning, hvor der fokuseres på helbredsomkostninger fra luftforurening fra energiforbrug. En generel beskrivelse af ideen bag CEEH findes i [CEEH Scientific report no. 1](#).

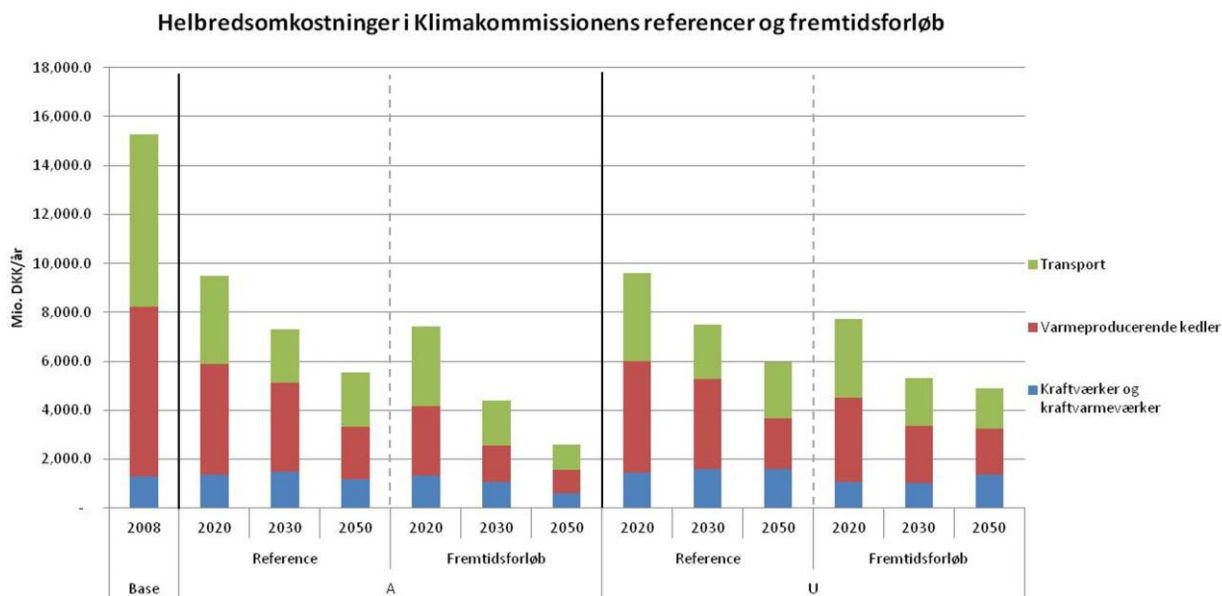
Kendskab til luftforureningens omfang og dens skadelige virkninger på mennesker bruges i en kombination af atmosfæriske transportmodeller og systemanalysemodeller, sammen med registre over befolkningens bosteder, aldersfordeling og sundhedstilstand. Dermed kan de samfundsøkonomiske omkostninger fra sygdom eller tidlig død som følge af luftforurening fra det danske energisystem beregnes. I CEEH beregnes helbredsomkostningerne under forskellige fremtidige scenarier frem til år 2050. Modelberegningerne er en iterativ proces, idet de beregnede energi-scenarier danner basis for emissions-scenarier, som igen er basis for bestemmelse af helbredsomkostninger, der så igen skal bruges til energisystem scenarierne og så fremdeles.

I det følgende gives først et kort overblik over de beregnede helbredsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens scenarier, hvorefter beregningsmetoden beskrives, efterfulgt af en mere detaljeret gennemgang af de beregnede omkostninger. Afslutningsvist præsenteres nogle forbehold i forbindelse med de aktuelle beregninger, og der konkluderes på de fundne resultater. Beregningsmetoden der forbinder helbredsomkostningerne og emissionerne med energisystemer er beskrevet i [CEEH Scientific report no. 3](#) og tidligere anvendt i IDAs Klimaplan 2050, dog med foreløbige omkostningsniveauer - og emissionsfaktorer (Mathiesen et.al, 2009).

## Helbredsomkostninger fra luftforurening i Klimakommissionens scenarier – Sammenfatning

Klimakommissionen udarbejdede to fremtidsforløb, der beskriver to forskellige veje til et dansk energisystem, der er uafhængigt af fossile brændsler i 2050. De to forløb er dels baseret på forskellige antagelser om udviklingen i brændselspriser og CO<sub>2</sub>-pris, dels på, at der i det ene scenarie ikke tillades, anvendelse af mere biomasse, end der kan produceres i Danmark (ca. 200 PJ/år) (forløb A), mens der ikke er et loft på forbruget af biomasse i det andet forløb (dvs. import af store mængder biomasse tillades) (forløb U). I fremtidsforløb U anvendes der i 2050 ca. dobbelt så meget biomasse som den vurderede danske ressource. Begge scenarier sammenlignes med et tilhørende referenceforløb, hvor fossile brændsler ikke udfases (dvs. der er to forskellige referenceforløb og to forskellige scenarier, også kaldet fremtidsforløb). Klimakommissionens vurdering af omkostningerne ved at gøre sig uafhængig af fossile brændsler er, således, beregnet som forskellen mellem en referenceudvikling og selve scenarierne/fremtidsforløbene.

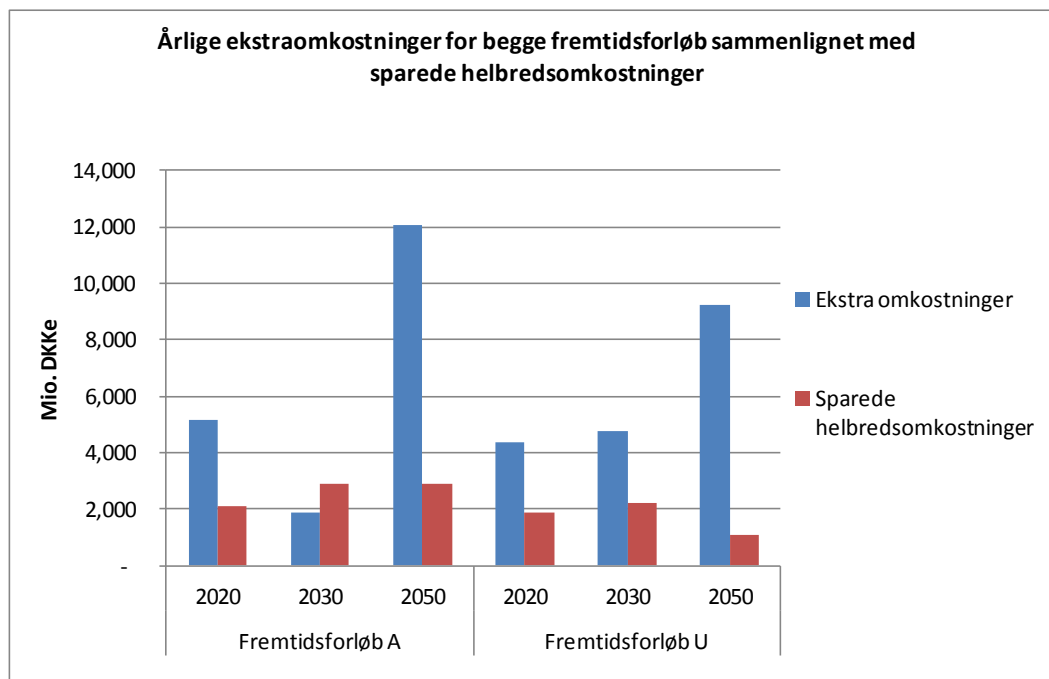
I denne rapport har vi beregnet helbredsomkostninger i Europa knyttet til danske udledninger for alle de fire forløb (to referencer og to fremtidsforløb). Omkostningerne fra danske udledninger i Danmark udgør ca. 15% af de samlede beregnede helbredsomkostninger. De overordnede resultater af analyserne kan ses af nedenstående figur 1. Helbredsgevinsterne for samfundet kan aflæses som forskellen i den beregnede helbredsomkostning for referencen fratrasket omkostningen i scenariet i det samme år.



Figur1: Helbredsomkostninger fra luftforurening beregnet for Klimakommissionens referenceforløb A og U og fremtidsforløb A og U fordelt på tre hovedsektorer, der tilsammen dækker hele energisystemet undtaget udenrigs luft- og skibsfart. I Fremtidsforløb U tillades nettoimport af biomasse.

Som det fremgår af figur 1, indebærer fremtidsforløb U noget større helbredsomkostninger end fremtidsforløb A, særligt i 2050, hvilket skyldes, at der indgår langt mere biomasse til energiformål i fremtidsforløb U og dermed tilhørende luftemissioner. I alle scenarier sker en kraftig reduktion i helbredsomkostningerne fra luftforureningen frem til 2020, hvilket skyldes allerede vedtaget EU-lovgivning og forventet kommende krav fra EU til motorer, kraftværker samt anden teknologisk udvikling. Klimakommissionen konkluderer, at ekstraomkostningerne for samfundet ved at vælge en vej uden fossile brændsler er mellem 2 og 12 mia. kr om året (Klimakommissionen 2010). Ekstraomkostningen svinger lidt mellem scenarier og de præsenterede år afhængig af, hvornår forskellige investeringer falder. Som nævnt indeholder Klimakommissionens beregnede ekstraomkostninger ikke gevinster fra sparede eksternaliteter som f.eks. helbredseffekter.

I figur 2 sammenlignes klimakommissionens beregnede ekstraomkostninger med de reducerede helbredsomkostninger, som blev præsenteret i figur 1. Helbredsbesparelserne i figur 2 er udregnet som forskellen i helbredsomkostning mellem referencen og fremtidsforløbet for det pågældende år, jævnfør figur 1.



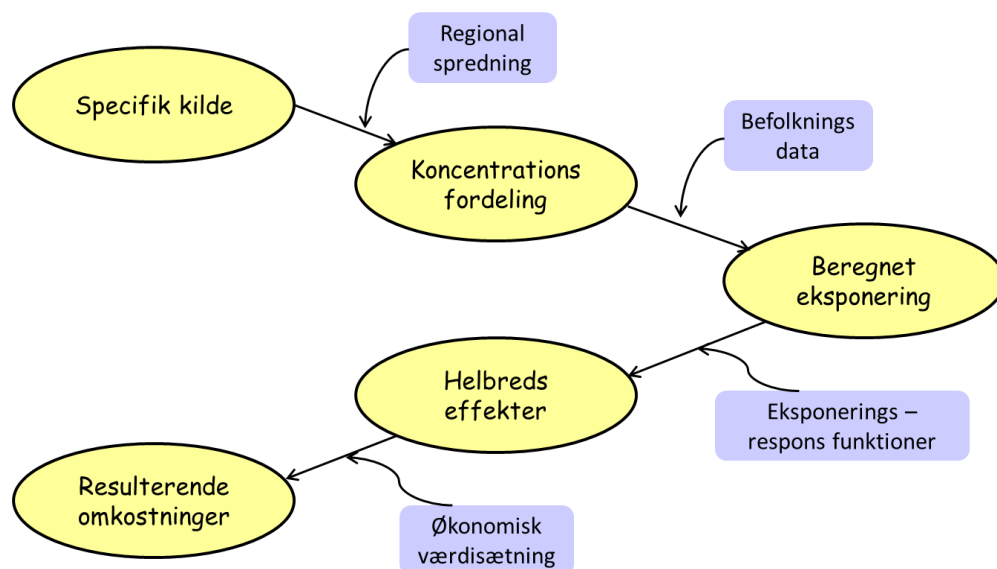
**Figur 2: Sammenligning af Klimakommissionen beregnede ekstraomkostning ved omstilling til fossilfrit energisystem med de af CEEH beregnede sparede helbredsomkostninger. Til venstre vises resultaterne for Klimakommissionens fremtidsforløb A (uden biomasse import) og til højre for fremtidsforløb U (med biomasseimport).**

De årlige besparelser i helbredsomkostninger ligger i begge fremtidsforløb på omkring 2-3 mia. kr. Dvs. hvis de eksterne omkostninger til helbredseffekter fra luftforurening indregnes, så vil ekstraomkostningen for at gøre Danmark uafhængig af fossile brændsler falde med omkring 2 mia.kr. om året, hvilket er en markant reduktion (på mellem 50-100 %) i årene frem til 2030. Efter 2030 stiger omkostninger i Klimakommissionens fremtidsforløb pga en omlægning af transportsektoren, der er den dyreste sektor at omlægge, dermed fylder de sparede helbredsomkostninger relativt mindre. I år 2050

er der en markant forskel på de sparede helbredsomkostninger mellem de to fremtidsforløb. Hvilket som nævnt skyldes at fremtidsforløb U hovedsageligt baserer sig på biomasse til transportbrændsler samt til el- og varmeproduktion, mens fremtidsforløb A hovedsageligt baserer sig på elproduktion fra vind samt en elektrificeret transportsektor.

## Metode til bestemmelse af helbredsomkostninger fra luftforurening

I CEEH beregnes de sparede helbredsomkostninger fra luftforurening blandt andet ved hjælp af EVA-systemet (Economic Valuation of Air pollution) som er udviklet på Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet. Det er dette system, der er benyttet her, og det består af modeller og datasæt, der tilsammen kan beregne de omkostninger, som er relateret til helbredseffekter, der knytter sig til emissionen fra en specifik kilde eller et specifikt emissionsscenarie. En skematisk illustration af EVA systemets komponenter kan ses i figur 3. Med udgangspunkt i et emissionsscenarie (og et meteorologisk datasæt) for den nordlige halvkugle beregner kemi- og spredningsmodellen DEHM den årlige gennemsnitlige koncentration af relevante kemiske komponenter som følge af emissionerne i scenariet. Modellen er gitterbaseret, og de beregnede koncentrationer for Danmark er tilgængelige med en horisontal opløsning på ca. 17 km x 17 km. Koncentrationerne kobles herefter med befolkningsdata, hvorved omfanget af den menneskelige eksponering bestemmes. Med udgangspunkt heri og i eksponerings – respons relationer kan antallet af dødsfald, tabte leveår og øvrige helbredseffekter estimeres. I EVA er alle helbredseffekter tilknyttet en omkostning, og den samlede omkostning som følge af et specifikt emissionsscenario fås ved at summere omkostningerne over alle de forskellige helbredsudfald som luftforureningen er skyld i. I tabel 1 ses helbredsomkostningen pr. kg udledt stof for forskellige typer og kilder.



Figur 3: EVA systemets komponenter; Emissionsscenariet (den specifikke kilde) giver ved hjælp af en regional beregning af spredning og omdannelse, en koncentrationsfordeling. Denne ganges med befolkningsdata for at give den beregnede eksponering. Ved hjælp af eksponerings-respons funktioner kan antallet af helbredsudfald estimeres – disse ganges med værdien for hvert udfald og summeres til de resulterende omkostninger.



For at kunne beregne helbredsomkostningerne for et fremtidigt energisystem er det nødvendigt at kunne sætte en pris per enhed af emissioner. Priserne for et enkelt stof varierer på tværs af kilder. Eksempelvis er der stor forskel på helbredsomkostningen i forbindelse med emissioner fra kraftværker og vejtrafik, hvor sidstnævnte har den største omkostning. De priser, der anvendes i denne rapport, er beregnet i CEEH-EVA systemet i løbet af CEEH projektet, og de er gengivet i tabel 1. Baggrunden for og beregningerne af disse findes i CEEH rapport nr. 3 ([CEEH Scientific Report No 3](#)).

Kr./kg	Kraftværker	Vejtrafik	Industri	Individuel opvarmning	Indenrigs skibstrafik samt andre mobile enheder
PM2,5	142	328	146	210	252
NOx og nitrat	62	78	82	132	67
SO2 og sulfat	87	681	114	160	80
CO	0.008	0.021	0.010	0.014	0.016

Tabel 1: Priser pr. kg udledt stof for forskellige kilder, til brug i beregning af helbredsomkostninger. Se i øvrigt CEEH rapport nr. 3 ([CEEH Scientific Report No 3](#)).

## Beregning af helbredsomkostninger fra luftforurening i

### Klimakommissionens fremtidsforløb

De fire forskellige fremtidsforløb, der blev præsenteret af Klimakommissionen, indebærer alle forskellige energirelaterede emissioner. Institut for Miljøvidenskab, AU, har estimeret emissionsfaktorer for hver af de teknologier og brændstoffer, der anvendes i Klimakommissionens forløb, og ved hjælp af disse emissionsfaktorer har vi beregnet de samlede emissioner fra hver af de forskellige sektorer i hvert forløb. Da helbredseffekter af udledningen af f.eks. 1 kg SO<sub>2</sub> fra et kraftværk er meget forskellig fra udledning af 1 kg SO<sub>2</sub> fra en bil, er der foretaget en opdeling af emissionerne på forskellige typer teknologier og sektorer. De forskellige helbredseffekter skyldes bl.a., at kraftværker typisk ligger uden for byzoner og samtidig har høje skorstene, der gør, at forureningen bliver spredt ud over større områder og dermed fortyndes, mens bilerne udleder tæt ved beboelse og hvor mange folk færdes. I forbindelse med disse beregninger er kraftværkerne delt op i centrale og decentrale kraftværker, varmeproduktionen er delt op på fjernvarmekedler og individuelle kedler, fx olie og naturgasfyr, brændeovne mv. Industriens procesenergiforbrug og transportsektoren er behandlet selvstændigt. For transportsektoren er der foretaget en opdeling på både køretøjstype og brændstoftype.

Beregningen af helbredsomkostningerne tager udgangspunkt i den seneste viden om helbredsomkostninger, der følger af emissioner fra det konkrete brændsel og den konkrete teknologi. Derudover tages i betragtning hvor disse punktkilder typisk er placeret og hvor mange mennesker, der vil opleve gener (helbredseffekter) pga. disse emissioner. Det skal bemærkes, at det i denne rapport, kun er eksternaliteter i form af helbredsomkostninger fra luftemissioner, der behandles. Der er således ikke beregnet miljøomkostninger pga. skader på naturtyper eller dyrearter mv., eller omkostninger som følge af skader på kulturarv som f.eks. bygninger.

## Klimakommissionens forløb

Klimakommissionens fremtidsforløb er opstillet under forudsætning af en økonomisk vækst på gennemsnitligt ca. 1.7 % årligt frem mod 2050. Da der forventes en stærk sammenhæng mellem økonomisk vækst og efterspørgsel på energitjenester, er den estimerede fremtidige energiefterspørgsel følsom overfor den antagne økonomiske udvikling.

Energiefterspørgsel kan med fordel udtrykkes i efterspørgsel efter såkaldte energitjenester. Energitjenester indebærer f.eks. antal oplyste eller opvarmede m<sup>2</sup>, ydelse fra et produktionsapparat, eller personkilometer kørt. Tabel 2 nedenfor illustrerer den antagne vækst i energi- og transporttjenester i Klimakommissionens forløb. Produktionserhvervene forventes f.eks., at producere 1,2 gange mere i 2020 og 2,36 gange mere i 2050 end i 2008. Dette betyder, at sektorernes energiforbrug vil vokse med samme faktor, hvis ikke energieffektiviteten for apparater, bygninger, produktionsudstyr og køretøjer øges i perioden.

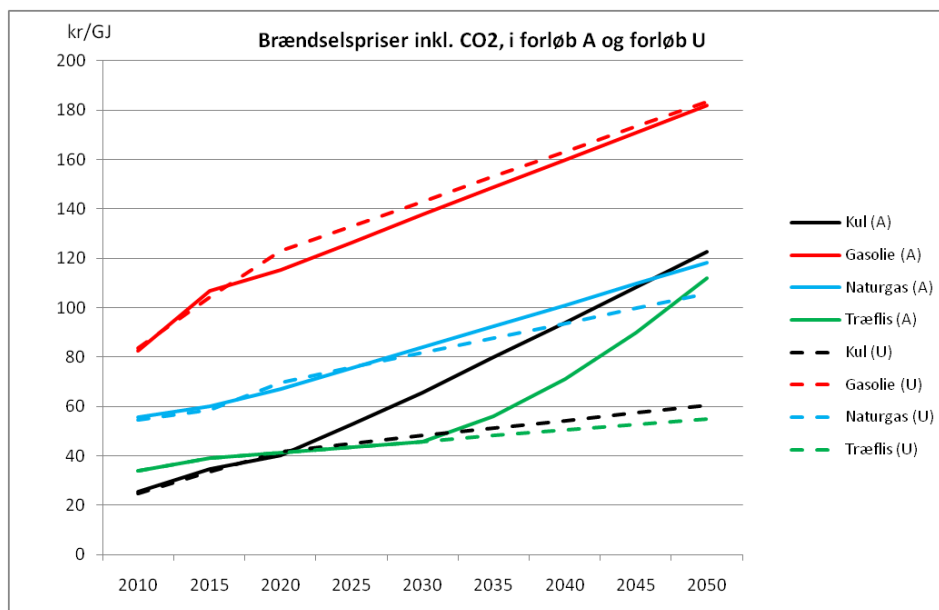
Vækst i energitjenester	2008	2020	2050
Persontransport	100	121	172
Godstransport	100	127	249
Produktionserhverv	100	120	236
Handel og service	100	122	220
El i husholdninger	100	124	235
Rumvarme	100	111	151

Tabel 1: Forudsætninger om vækst i energitjenester

En vigtig forskel på Klimakommissionens to forløb er, hvad der antages om klimapolitikken i resten af verden. I **forløb A** forudsættes en meget aktiv global klimaindsats, som medfører en begrænset efterspørgsel efter fossile brændsler og derfor forholdsvist lave olie-priser. Til gengæld dannes en høj markedspris på CO<sub>2</sub>, ligesom prisen på biomasse forudsættes at stige betydeligt frem til 2050. Forløbet forudsætter desuden, at Danmarks nabolande omstiller deres energisystem til betydelig lavere CO<sub>2</sub>-udledning bl.a. ved, at de foretager en kraftig udbygning med vindkraft. Brændsels- og CO<sub>2</sub>-priserne i dette forløb er baseret på en forlængelse af *IEA's 450 ppm scenarie* fra World Energy Outlook 2009. CO<sub>2</sub>-kvoteprisen forudsættes at stige fra ca. 110 kr./ton i 2010 til 250 kr./ton i 2020 og 1150 kr./ton i 2050.

**Forløb U** har som forudsætning, at verden generelt er uambitiøs med henblik på reduktion i udledningen af drivhusgasser. Brændsels- og CO<sub>2</sub>-prisforudsætninger er baseret på WEO2009's referencescenarie, hvor koncentrationen af CO<sub>2eqv.</sub> på lang sigt vil stige til 1000 ppm, hvis udviklingen fortsættes, svarende til en temperaturstigning på over 6°C. Den begrænsede globale klimaindsats giver anledning til høje fossile brændselspriser som følge af en fortsat høj efterspørgsel og en moderat CO<sub>2</sub>-

pris. Da der ikke er efterspørgsel på biomasseresurserne fra omverdenen af hensyn til reduktion af CO<sub>2</sub>-udledning, er biomassepriserne forudsat forholdsvis lave.



Figur 4: Forudsætninger om udvikling i brændselspriser, inkl. indregning af CO<sub>2</sub>-omkostninger.

Når CO<sub>2</sub>-prisen lægges oveni brændselsprisen, bliver kul et meget dyrere brændsel i forløb A end i forløb U, og naturgas bliver noget dyrere, mens gasolie har ca. samme pris i begge forløb. Træflis (som her repræsenterer fast biomasse) bliver på lang sigt også en god del dyrere i forløb A end i forløb U, hvilket skyldes en høj efterspørgsel internationalt efter biomasse til energiformål i en klimaambitiøs verden.

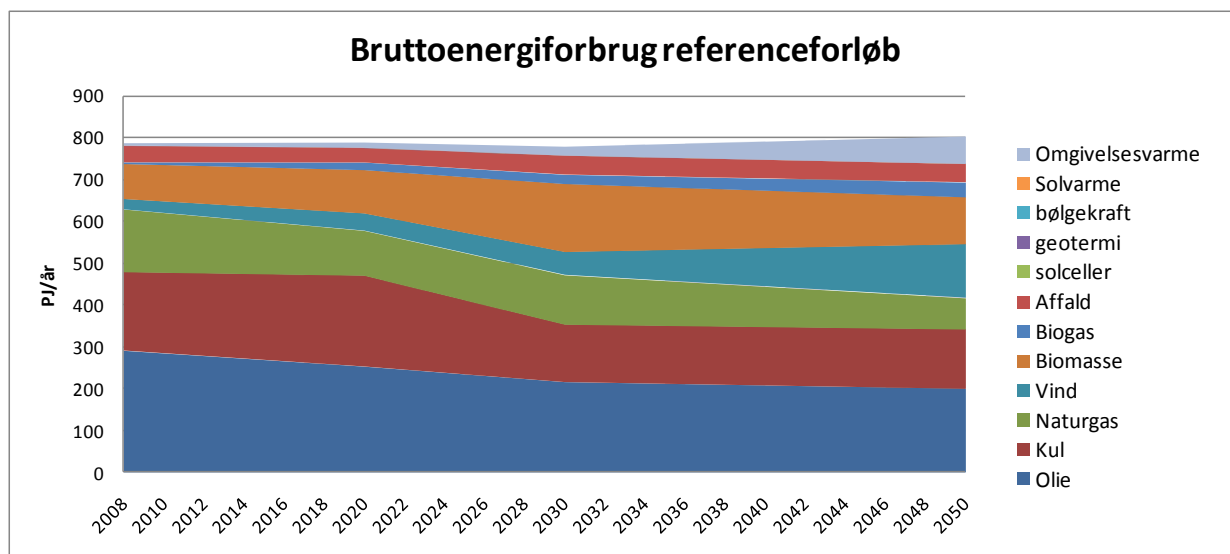
## Energiforbrug i Klimakommissionens reference og fremtidsforløb

I dette afsnit præsenteres Klimakommissionens to fremtidsforløb med tilhørende referencer kort. Beskrivelserne er baseret på Klimakommissionens baggrundsrapporter om hhv. uambitiøs (U) og ambitiøs (A) reference og fremtidsforløb; alle baggrundsrapporter kan findes på [www.klimakommissionen.dk](http://www.klimakommissionen.dk).

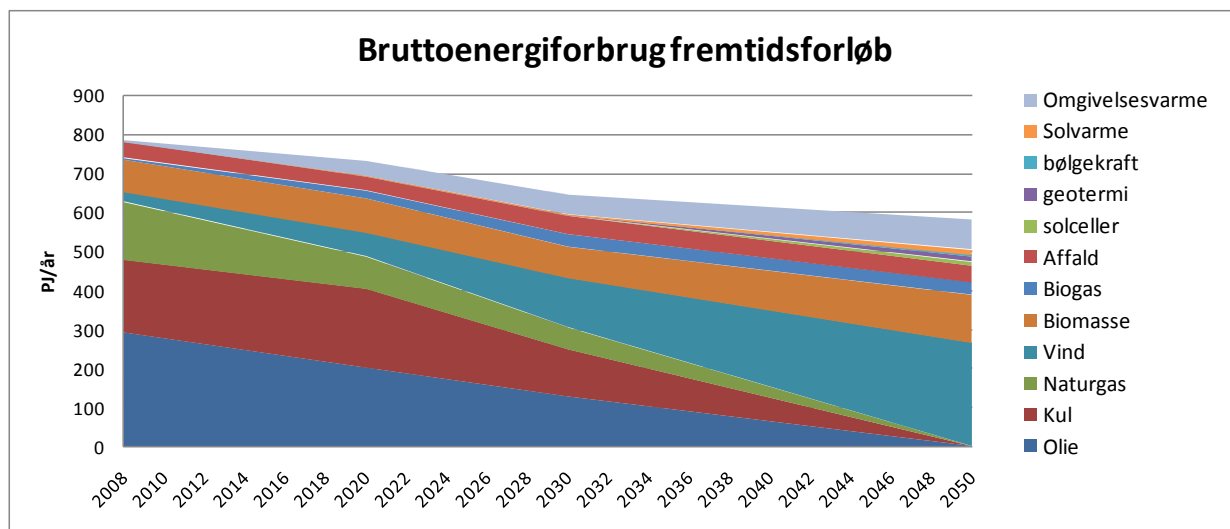
### Forløb A

Bruttoenergiforbruget i fremtidsforløb A er i 2050 ca. 580 PJ, hvilket er betydeligt lavere end i referencen 2050 (ca. 800 PJ) og i dag (ca. 790 PJ). Konkret består bruttoenergiforbruget i fremtidsbilledet for 2050 af godt 200 PJ biomasse, biogas og affald, ca. 280 PJ vindkraft (og bølgekraft og sol), knap 25 PJ solvarme og geotermi, og 75 PJ omgivelsesvarme. At bruttoenergiforbruget kan reduceres betydeligt i forhold til i dag, skyldes dels energieffektivisering og energibesparelser hos forbrugerne, dels at vindkraft udgør så stor en andel af produktionen. Og vindkraft har per definition ikke noget konverteringstab.

Nedenstående figurer og tabeller viser udviklingen i bruttoenergiforbrug i henholdsvis referenceforløbet og fremtidsforløbet.



**Figur 5: Forløb A: Udvikling i bruttoenergiforbrug i referenceforløb.** Omgivelsesvarme omfatter både individuelle og kollektive varmepumper. I figuren indgår ikke naturgasforbrug i forbindelse med olieudvinding i Nordsøen (28 PJ i 2008), brændstof til udenrigsfly (35 PJ i 2008) samt energi til ikke energiformål (11 PJ i 2008). Kilde: Risø DTU og EA Energianalyse (2010a).



**Figur 6: Forløb A: Udvikling i bruttoenergiforbrug i fremtidsforløb.** Omgivelsesvarme omfatter både individuelle og kollektive varmepumper. I figuren indgår ikke naturgasforbrug i forbindelse med olieudvinding i Nordsøen (28 PJ), brændstof til udenrigsfly samt energi til ikke energiformål (11 PJ). Kilde: Risø DTU og EA Energianalyse (2010a).

I fremtidsforløbet fordobles den samlede elproduktion, og udbygning med vindmøller – særligt til havs – er et af de vigtigste tiltag. Beregningerne viser, at der er brug for ca. 19000 MW vindkraft i 2050. Til sammenligning var der ved udgangen af 2008 installeret ca. 3150 MW. Med eksisterende udbud og planer for udbygning til lands forventes dette tal at stige til godt 4000 MW i 2012. I fremtidsforløbet er der i 2020 opstillet ca. 3300 MW landvind og ca. 2400 MW havvind.

De store mængder vindkraft i 2050 integreres dels i nabolandene via det nordeuropæiske elmarked, dels indenlandsk. Indenlands nyttiggøres vindkraften i fjernvarmesektoren, i transportsektoren til elbiler, til

metanol- eller brintproduktion, og til procesenergi i industrien. Når det ikke blæser, forsynes elforbrugerne fra biomasse-, affalds- og biogaskraftvarmeanlæg, samt via import fra Danmarks nabolande. Den importerede elektricitet vil blandt andet blive leveret fra de Nordiske vandmagasiner, som vindkraften har bidraget til at fylde op. Der er desuden indregnet en betydelig mængde backup kapacitet i form af gasturbiner drevet på forgasset biomasse til at håndtere spidslastsituationer.

I referencen leveres hovedparten af elproduktionen i 2050 fra vindkraft og kulkraft med CCS. Kulkraft med CCS forudsættes at blive en kommercielt tilgængelig teknologi, og på længere sigt bliver den økonomisk attraktiv pga. den kraftigt stigende CO<sub>2</sub>-pris i det ambitiøse forløb.

I Referencen ses en større anvendelse af biomasse i den første del af perioden i forhold til fremtidsforløbet. Den største anvendelse af biomasse sker til individuel opvarmning. Fra 2020 til 2030 sker en stigning i anvendelsen af biomasse til kraftvarme som følge af den stigende CO<sub>2</sub>-pris. Efter 2030 erstatter kulkraftanlæg med CCS-teknologi produktionen fra biomassekraftvarmeværkerne.

Anvendelsen af biobrændsler til transportsektoren i fremtidsforløbet øges særligt i den sidste 20 års periode frem mod 2050. Anvendelse af biomasse til individuel opvarmning forudsættes reduceret meget væsentligt i fremtidsforløbet til fordel for fjernvarme og varmepumper.

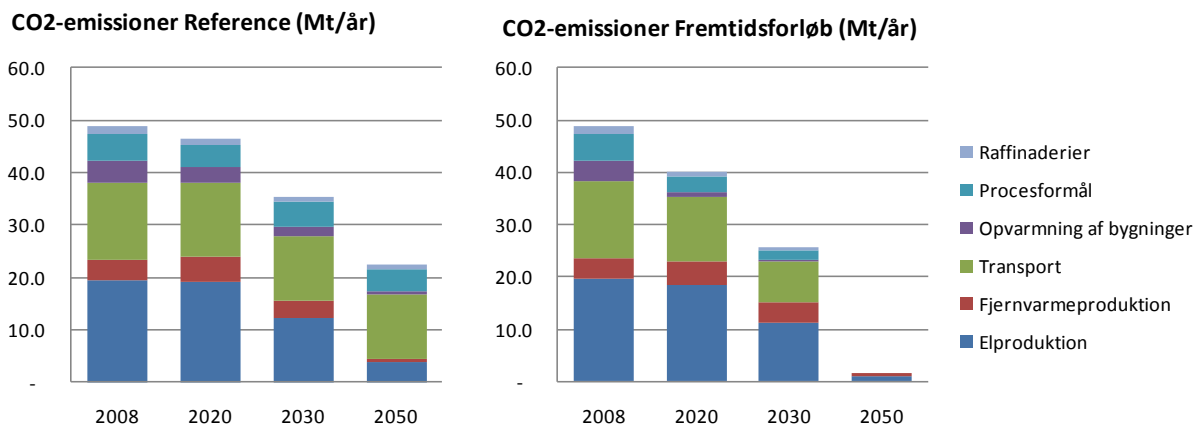
Reference og fremtidsforløb A resulterer begge i et biomasseforbrug på lidt under 200 PJ/år i år 2050, hvilket er godt 30 PJ under den opgjorte indenlandske ressource.

Der er udstrakt anvendelse af elektriske køretøjer i fremtidsforløb A. Dette skyldes dels elbilens favorable energiøkonomi, dels den "begrænsede" adgang til bioressourcer i forløbet. Elkøretøjer udfører, således størstedelen af transportarbejdet udført af personbiler, varebiler og busser på korte afstande. El anvendes ligeledes i stort omfang i forbindelse med intern transport i landbrug og industri. En del af elkøretøjerne vil være plug-in hybridbiler, som anvender el på korte og mellemlange distancer og biobrændstof på lange ture.

Forbedring af effektiviteten af køretøjsparken, udover niveauet som indgår i referencen, er et vigtigt tiltag i fremtidsforløbet. Det er forudsat, at det er muligt at forcere effektivitetsudviklingen for nye biler med forbrændingsmotor i Danmark, således at de i fremtidsforløbet er nede på 120 g CO<sub>2</sub>/km i 2020 og 90 g/km i 2030. I 2050 antages energieffektiviteten i fremtidsbilledet forbedret til 75 g/km, hvilket vurderes at være tæt på det teknisk maksimale forbedringspotentiale for en standard personbil med konventionel forbrændingsmotor. Der er ikke forudsat omlægninger mellem transportformerne i forhold til i dag, og der er ikke indregnet særlige initiativer (f.eks. fysisk planlægning) med det formål at reducere behovet for transport.

De energirelaterede CO<sub>2</sub>-emissioner reduceres i både referenceforløbet og fremtidsforløbet sammenlignet med i dag (figur 7). Det er særligt emissionerne inden for el – og fjernvarmeproduktion, der reduceres på kort sigt, samt emissionerne indenfor øvrig stationær energi, som dækker over erhvervenes og husholdningernes anvendelse af brændsler til proces og varmeformål. I den sidste del af perioden frem mod 2050 reduceres CO<sub>2</sub> emissionerne fra transportsektoren kraftigt i takt med, at

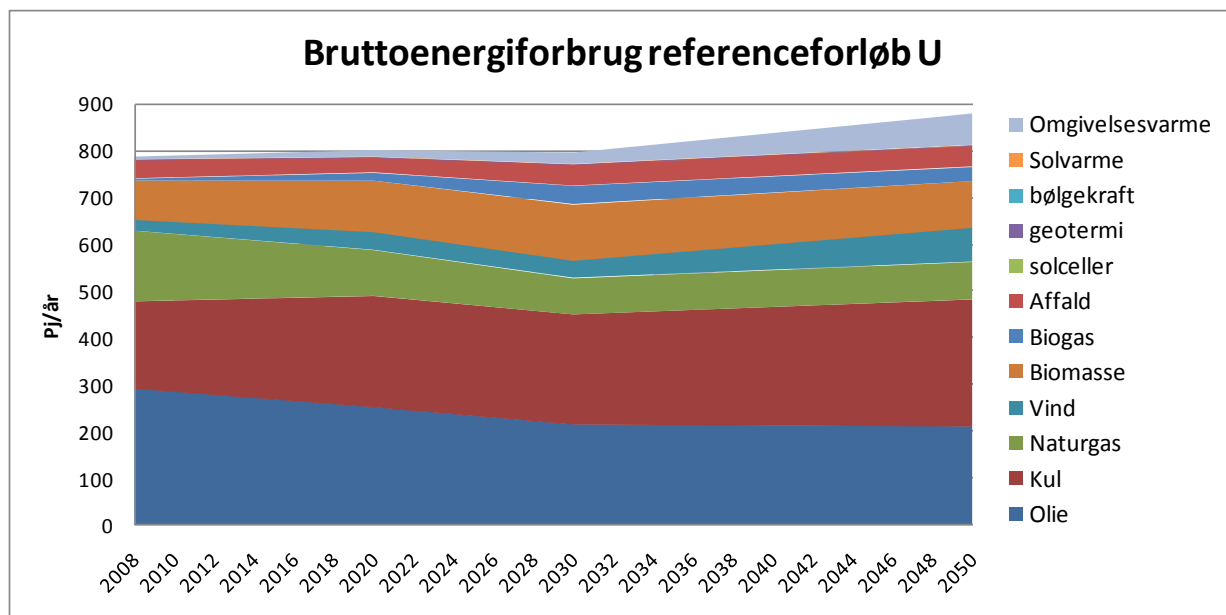
elteknologier vil være i stand til at erstatte den traditionelle forbrændingsmotor i mange køretøjer. I 2050 stammer de eneste energirelaterede CO<sub>2</sub>-emissioner fra affaldskraftsvarme- og varmeværker.



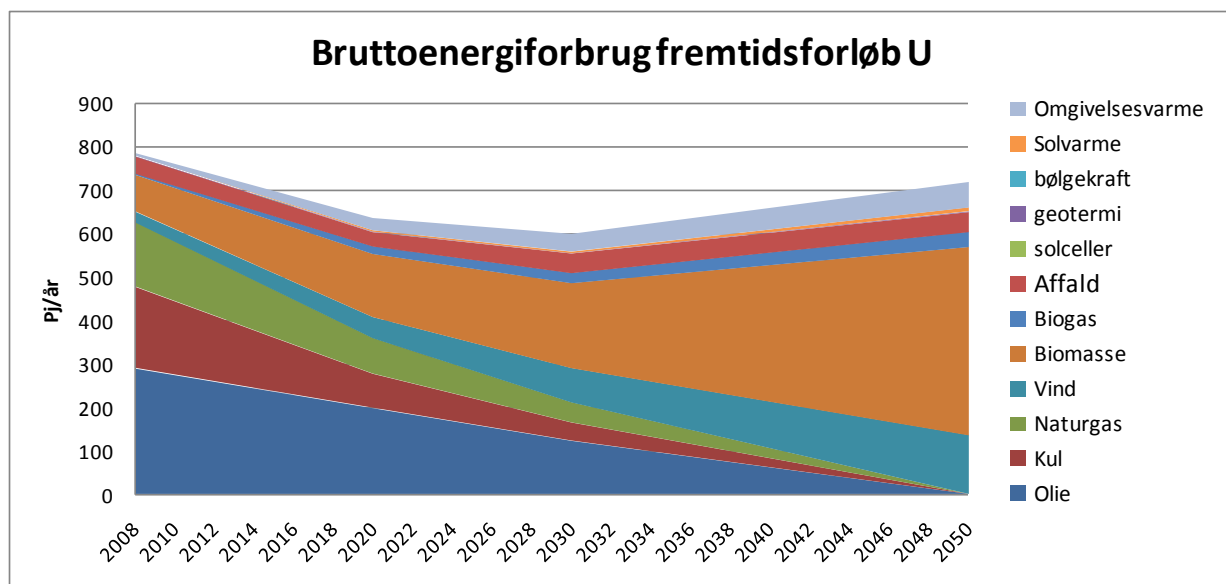
Figur 7: Forløb A: CO<sub>2</sub>-emissioner fra energiforbrug historisk og i reference- og fremtidsforløb A. CO<sub>2</sub>-emissioner relateret til energiudvinding i Nordsøen samt emissioner fra udenrigsluftfart er ikke indregnet. CO<sub>2</sub>-udledningen i fremtidsforløbet i 2050 stammer fra afbrænding af fossilt affald.

### Forløb U

Fremtidsforløbets bruttoenergiforbrug er i 2050 ca. 720 PJ, hvilket er lidt lavere end i referencen (880 PJ) og i dag. Konkret består bruttoenergiforbruget i fremtidsbilledet for 2050 af godt 515 PJ biomasse, biogas og affald, ca. 136 PJ vindkraft og knap 10 PJ solvarme og geotermi samt 60 PJ omgivelsesvarme.



Figur 8: Forløb U: Udvikling i bruttoenergiforbrug i referenceforløb. Omgivelsesvarme omfatter både individuelle og kollektive varmepumper. I figuren indgår ikke naturgasforbrug i forbindelse med olieudvinding i Nordsøen (28 PJ), brændstof til udenrigsfly (35 PJ) samt energi til ikke energiformål (11 PJ). Kilde: Risø DTU og EA Energianalyse (2010b).



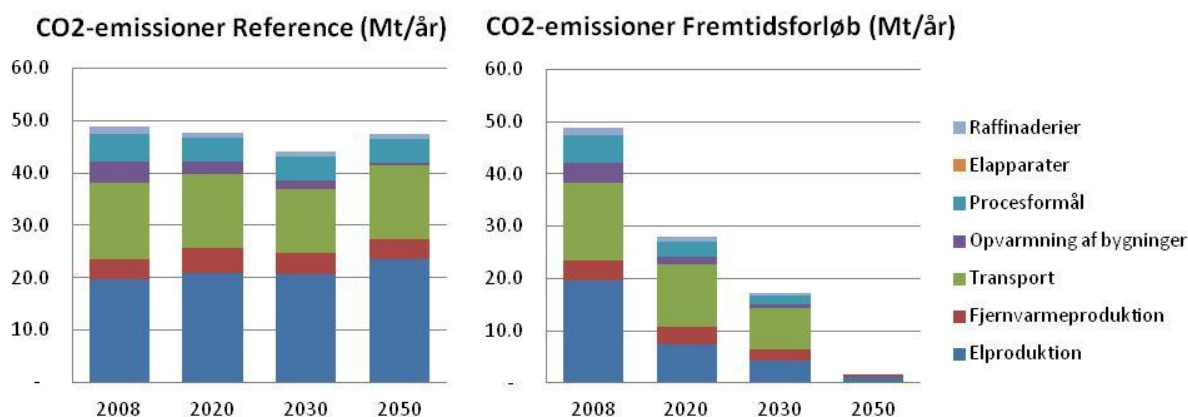
Figur 9: Forløb U: Udvikling i bruttoenergiforbrug i fremtidsforløb. Omgivelsesvarme omfatter både individuelle og kollektive varmepumper. I figuren indgår ikke naturgasforbrug i forbindelse med olieudvinding i Nordsøen (28 PJ), brændstof til udenrigsfly (35 PJ) samt energi til ikke energiformål (11 PJ). Kilde: Risø DTU og EA Energianalyse (2010b).

Elproduktionen består i fremtidsforløbet af en kombination af vindkraft og el produceret af fast biomasse, biogas og affald. Den totale vindkraftkapacitet øges fra godt 3000 MW i dag til ca. 9800 MW i fremtidsforløbet i 2050, heraf ca. 4000 MW på land og ca. 5800 MW til havs. Vindkraft integreres via det nordeuropæiske elmarked og ved at anvende el til fjernvarmeproduktion, individuelle varmepumper og også i betydeligt omfang i transportsektoren til elbiler. I referencen leveres hovedparten af elproduktionen fra kulkraft (uden CCS teknologi) og i mindre omfang fra vindkraft.

I fremtidsforløbet sker der en meget stor forøgelse af biomasseanvendelsen i forhold til i dag. Efter 2030 er der en betydelig nettoimport af biomasse. Biomassen anvendes i 2050 i særdeleshed til kraftvarmeproduktion og i transportsektoren til produktion af biobrændstoffer. Biogaspotentiallet udnyttes i fremtidsbilledet i 2050 til kraftvarmeproduktion og i transportsektoren i tunge køretøjer. Affaldsmængderne – som antages at stige over perioden – udnyttes på kraftvarmeanlæg. Den stigning, der ses i bruttoenergiforbruget, ifht fremtidsforløb A skyldes øget brug af biomasse til el- og varmeproduktion samt til produktion af biobrændsler. Der er et konverteringstab forbundet med at producere biobrændsler, el- og varme fra biomasse i modsætning til i fremtidsforløb A, hvor hovedparten af energiefterspørgslen dækkes af vind, der ikke har et konverteringstab.

Til personbiltransport udgør elbiler 40 % af transportarbejdet i fremtidsforløbet i 2050, mens den resterende del dækkes med biobrændstoffer. Biobrændstof – primært i form af 2.g biodiesel – anvendes til den største del af godstransportarbejdet. Antagelserne omkring effektivitetsforbedringer er de samme som i forløb A. Der er ikke forudsat omlægninger mellem transportformerne i forhold til i dag, og der er ikke indregnet særlige initiativer (f.eks. fysisk planlægning) med det formål at reducere behovet for transport.

De energirelaterede CO<sub>2</sub>-emissioner holdes stort set konstant i referencen, mens der sker en kraftig reduktion i fremtidsløbet. Det er især den stigende anvendelse af biomasse til energiformål, energieffektiviseringer samt en øget andel af vindkraft i elproduktionen, som er medvirkende til at reducere CO<sub>2</sub> emissionerne. I 2050 stammer de eneste energirelaterede CO<sub>2</sub>-emissioner i fremtidsforløbet fra affaldskraftsvarme- og varmeværker.



Figur 10: Forløb U: CO<sub>2</sub>-emissioner fra energiforbrug historisk og i reference- og fremtidsforløb U. CO<sub>2</sub>-emissioner relateret til energiudvinding i Nordsøen samt emissioner fra udenrigsluftfart er ikke indregnet. CO<sub>2</sub>-udledningen i fremtidsforløbet i 2050 stammer fra afbrænding af fossilt affald.

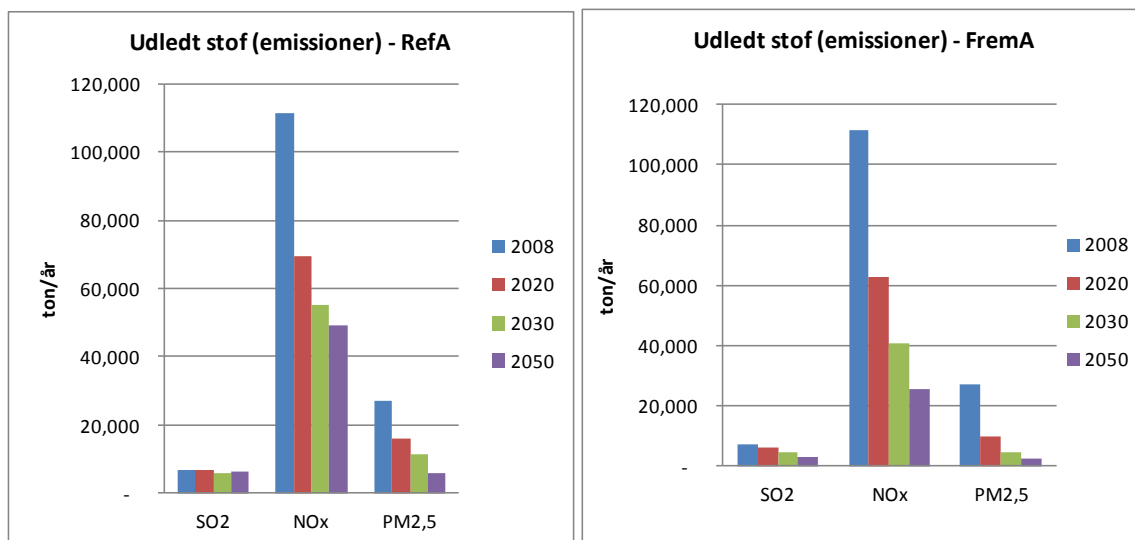
## Andre emissioner fra Klimakommissionens reference og fremtidsforløb

De andre emissioner, der behandles i denne rapport er emissioner, som har en helbredsmæssig effekt og som indgår i CEEH's system til vurdering af helbredseffekter fra luftforurening. Det drejer sig om stofferne SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO og partikler. I dette afsnit præsenteres udviklingen i udledning af de nævnte stoffer fra de to fremtidsforløb med tilhørende referencer.

### Forløb A

Udledningerne af SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO og partikler mere end halveres i fremtidsforløbet sammenlignet med referencen (figur 11). Den største faktiske reduktion i udledningen af luftforurening finder sted i perioden 2008-2020 for både referencen og fremtidsforløbet, derefter er reduktionen relativt større i fremtidsforløbet.



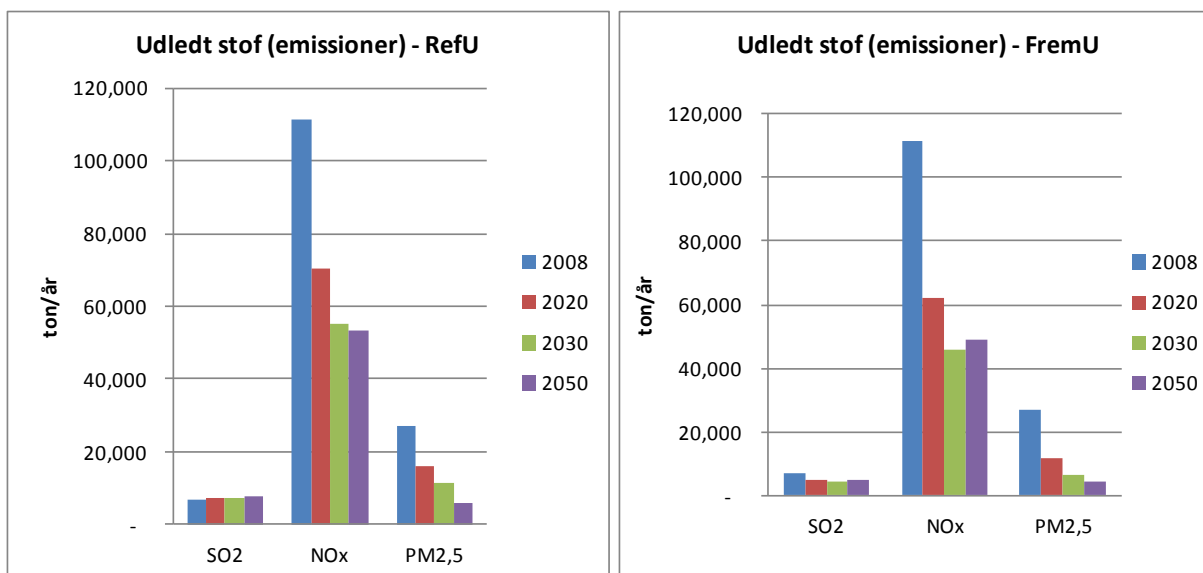


Figur 11: Forløb A: Udledning af udvalgte stoffer i reference A og fremtidsforløb A. Det er valgt ikke at vise CO i figuren, da det ikke kan vises på samme skala og desuden ikke beregnes til at have betydelige helbredsmæssige konsekvenser.

Den kraftige reduktion af CO og NO<sub>x</sub> mellem 2008 og 2020 skyldes hovedsagelig en voldsom nedgang i emissionerne fra transportsektoren samt fra varmeproducerende kedler. I referenceforløbet skyldes nedgangen i emissioner fra både transportsektoren og kedlerne den teknologiske udvikling, der reducerer emissionsfaktorerne (for kedlerne særligt for brændeovne), mens nedgangen i fremtidsforløbet også skyldes en nedgang i brugen af træpillefyr- og brændeovnsbaserede villaanlæg. Generelt gælder det, at udover, at den individuelle opvarmning af boliger skifter over til varmepumper, så skyldes reduktionerne hele elektrificeringen af energisystemet med en kraftig udbygning af vindkraft og eldrevne transport.

### Forløb U

I forløb U er udviklingen i emissioner mere heterogen. I referenceforløbet falder emissionerne af NO<sub>x</sub>, CO, og partikler jævnt over perioden, med størst fald mellem 2008 og 2020 for NO<sub>x</sub> og CO, mens udledningerne af SO<sub>2</sub> derimod stiger en lille smule (fra 2008 til 2020 på grund en stigning i produktion af kulkraft, der opvejer fald fra andre sektorer og teknologier). I fremtidsforløbet falder emissionerne af SO<sub>2</sub>, CO og partikler over hele perioden, mens der faktisk sker en stigning i NO<sub>x</sub> emissionerne fra 2030 til 2050. Dette skyldes hovedsageligt et stigende energiforbrug i kraft- og kraftvarmeverker, samtidigt med at produktionen flyttes fra centrale kul- og naturgasdrevne værker til decentrale værker, der drives på træflis og træaffald, som har betydeligt højere NO<sub>x</sub> emissioner end de centrale fossildrevne værker.



Figur 12: Forløb U: Udledning af udvalgte stoffer i reference U og fremtidsforløb U. Det er valgt ikke at vise CO i figuren, da det ikke kan vises på samme skala og desuden ikke beregnes til at have betydelige helbredsmæssige konsekvenser. Den kraftige reduktion af både NO<sub>x</sub> og CO mellem 2008 og 2020 i forløb U skyldes som i forløb A, en stor nedgang i emissionerne fra transportsektoren samt fra varmeproducerende kedler.

## Helbredsomkostninger

I det følgende gennemgås kort helbredsomkostningerne i de forskellige scenarier, opdelt på transport, varmeproducerende kedler, og kraft- og kraftvarmeverker. I appendiks vises en mere detaljeret opgørelse af helbredsomkostninger, med omkostningerne opdelt på de forskellige teknologier indenfor den enkelte sektor.

### Forløb A

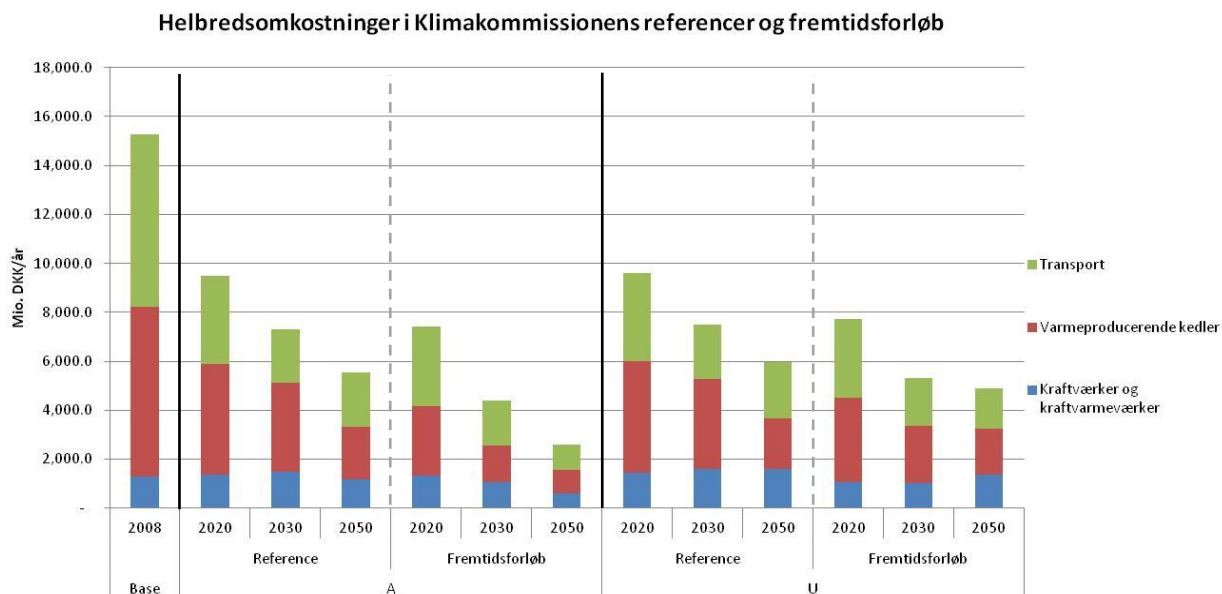
I forløb A sker der en meget stor reduktion i helbredsomkostninger fra 2008 til 2020. Reduktionen er noget større i fremtidsforløbet end i referencen. I Referencen finder den procentvis største reduktion i omkostningerne sted i transportsektoren, pga. introduktion af mere effektive køretøjer, mens den største procentvise reduktion i fremtidsforløbet er knyttet til de varmeproducerende kedler, da disse i høj grad erstattes af varmepumper. I 2050 er helbredsomkostningerne i fremtidsforløbet ca. det halve af hvad de er i referencen, og kun en femtedel af hvad det er i dag.

De tilbageværende helbredsomkostninger i 2050 skyldes brugen af affald og biomasse i kraftvarmeverker, biomasse i individuelle kedler samt biobrændsler i transportsektoren. I forløb A sker en kraftig elektrificering inden for forskellige sektorer. Industrien skifter i høj grad til elkedler, opvarmning af bygninger er hovedsageligt baseret på varmepumper og transportsektoren er elektrificeret, således at 90% af transportarbejdet i bil er dækket af elbiler.

### Forløb U

Helbredsomkostningerne i forløb U falder også betragteligt fra 2008 til 2020. Efter 2020 falder de noget mindre end i forløb A, og i fremtidsforløb U er omkostningerne i 2050 næsten det dobbelte af, hvad de

er i fremtidsforløb A. Dette skyldes at brugen af biomasse i forløb U, er væsentligt større som følge af antagelsen om lave biomassepriser i dette forløb, samt at det tillades netto at importere biomasse. Selvom der også sker en kraftig udbygning med vindkraft i forløb U, så spiller biomasse en større rolle i kraft- og kraftvarmeproduktionen, men især industrien bruger biomasse til procesenergi og det primære drivmiddel i transportsektoren er biobrændsler.



**Figur 13: Helbredsomkostninger fra luftforurening beregnet for Klimakommissionens referenceforløb A og U og fremtidsforløb A og U fordelt på tre hovedsektorer, der tilsammen dækker hele energisystemet undtaget udenrigs luft- og skibsfart. I Fremtidsforløb U tillades nettoimport af biomasse.**

## Konklusion og forbehold

CEEH har skabt et modelsystem til vurdering af omkostninger grundet helbredseffekter fra luftforurening. Denne rapport, som vurderer helbredseffekterne fra Klimakommissionen scenarier, er et eksempel på, hvordan systemet kan anvendes.

I rapporten har vi beregnet de helbredsomkostninger, der skyldes energiforbrug og -produktionen i Klimakommissionens fremtidsforløb. Omkostningerne forbundet med emissioner fra forskellige sektorer varierer, da de har forskellige effekter på helbred. Vi har i rapporten vist, hvor vigtigt det er at tage højde for helbredsomkostninger, når man vurderer og sammenligner de samlede omkostninger i forskellige fremtidsforløb. Hvis helbredsomkostninger inddrages i de samfundsøkonomiske vurderinger af Klimakommissionens fremtidsforløb, så falder den årlige udgift med ca. 2 mia. kr. Hertil skal det nævnes, at der udover helbredseffekter, findes andre eksternaliteter (som fx effekter på miljø og klima), der ikke normalt inddrages i de samfundsøkonomiske vurderinger, hvilket betyder, at de samfundsøkonomiske omkostninger ved skift mod renere energikilder ofte overvurderes. Mulige effekter af reduceret trafikstøj ved omlægning til el-biler og øget udsættelse for vindmøllestøj er

ligeledes udeladt, selvom støjbelastning af boliger især i byerne menes at have betydning for sygelighed og dermed samfundsøkonomien.

Det kan desuden nævnes, at Klimakommissionens ekstraomkostninger (blå søjler i figur 2) er baseret på en diskonteringsrente på 5%. Havde diskonteringsrenten været lavere var ekstraomkostningerne ved især fremtidsforløb A blevet væsentligt reduceret.

Omkostningerne for de forskellige typer emissioner fra forskellige sektorer anvendt i denne rapport er baseret på emissioner i år 2000. Dvs. de er fremkommet ved det mix af emissioner, der var i det pågældende år og med den specifikke placering af kilder og befolkning. I et fremtidigt energisystem vil emissionsmønstret dvs. styrken og placering af kilder ændre sig og befolkningstætheden i forskellige områder vil ændre sig. Længere fremme i tiden kan klimaændringer påvirke metrologien og dermed hvorledes luftforureningen transporteres rundt i atmosfæren. De kemiske reaktioner i atmosfæren er desuden ikke lineære og de fundne priser kan derfor ikke siges at gælde under alle forhold. Priserne gælder derfor først og fremmest for de specifikke kilder og år, som der er lavet beregninger for og skal derfor benyttes med forsigtighed.

Det er også vigtigt at pointere, at de helbredsomkostninger, der er medtaget, omfatter alle områder også udenfor Danmark, der påvirkes af danske emissioner. Dvs. det er kun en del af de beregnede omkostninger ca. 15%, der direkte påvirker det danske budget. Resten af effekterne vil bl.a. indgå i de internationale forhandlinger om reduktionsforpligtelser inden for forskellige emissionstyper. Da denne type luftforureningsmodeller bruges som udgangspunkt, når landene i EU aftaler reduktionskrav til luftforurening, så bliver Danmark også holdt ansvarlig for den påvirkning dansk luftforurening har i andre lande.

At inkludere helbredsomkostninger i andre lande fra dansk luftforurening, svarer lidt til betaling af en CO<sub>2</sub>-pris, som jo heller ikke direkte dækker skader i Danmark, men i princippet i hele verden.

## Referencer

[CEEH Scientific Report No 1](#) - Description of the CEEH integrated 'Energy-Environment-Health-Cost' modelling framework system. ISSN: 1904-7495 ([http://ceeh.dk/CEEH\\_Reports/Report\\_1/](http://ceeh.dk/CEEH_Reports/Report_1/))

[CEEH Scientific Report No 3](#) – Assessment of Health-Cost Externalities of Air Pollution at the National Level using the EVA Model System. Centre for Energy, Environment and Health Report series, ISSN: 1904-7495 ([http://ceeh.dk/CEEH\\_Reports/Report\\_3/](http://ceeh.dk/CEEH_Reports/Report_3/)).

Mathiesen, B. V., Lund, H., & Karlsson, K. 2009, IDAs Klimaplan 2050, baggrundsrapport - Tekniske systemanalyser, brændselsforbrug, drivhusgasser, samfundsøkonomiske konsekvenser, erhvervspotentialer, beskæftigelseseffekter samt helbredsomkostninger, IDA, Ingeniørforeningen Danmark, København, Denmark

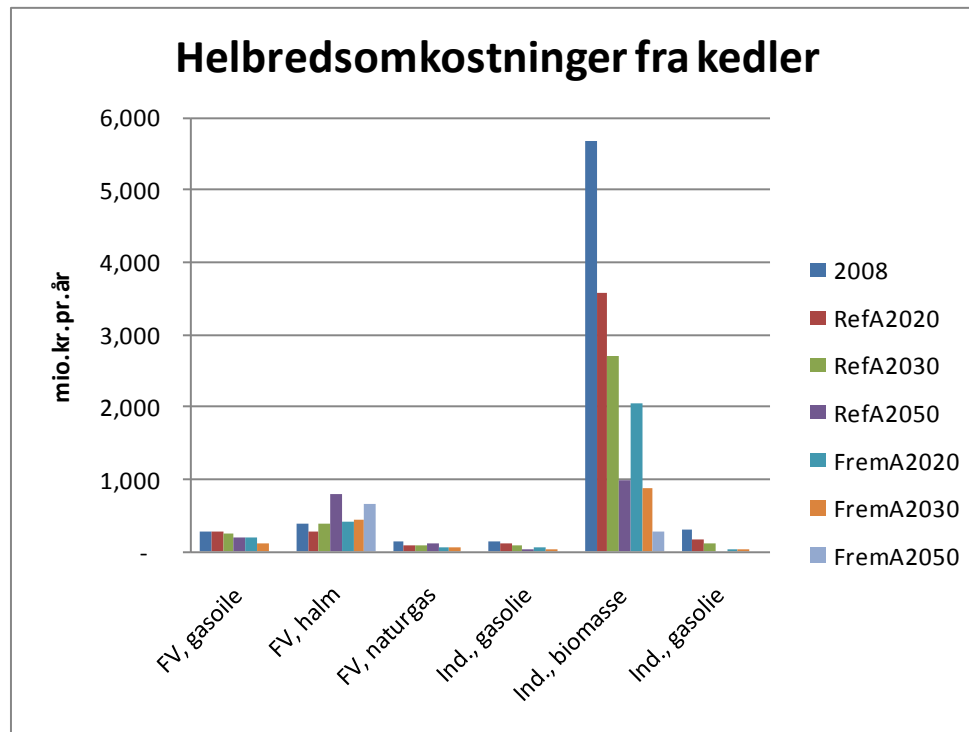
Klimakommissionen 2010 - Klimakommissionens rapport 2010: "[Grøn Energi - vejen mod et dansk energisystem uden fossile brændsler](#)".

Risø DTU og Ea Energianalyse. 2010a. [Baggrundsnotat om referenceforløb A og fremtidsforløb A. Ambitiøst fremtidsforløb uden mulighed for nettoimport af biomasse.](#)

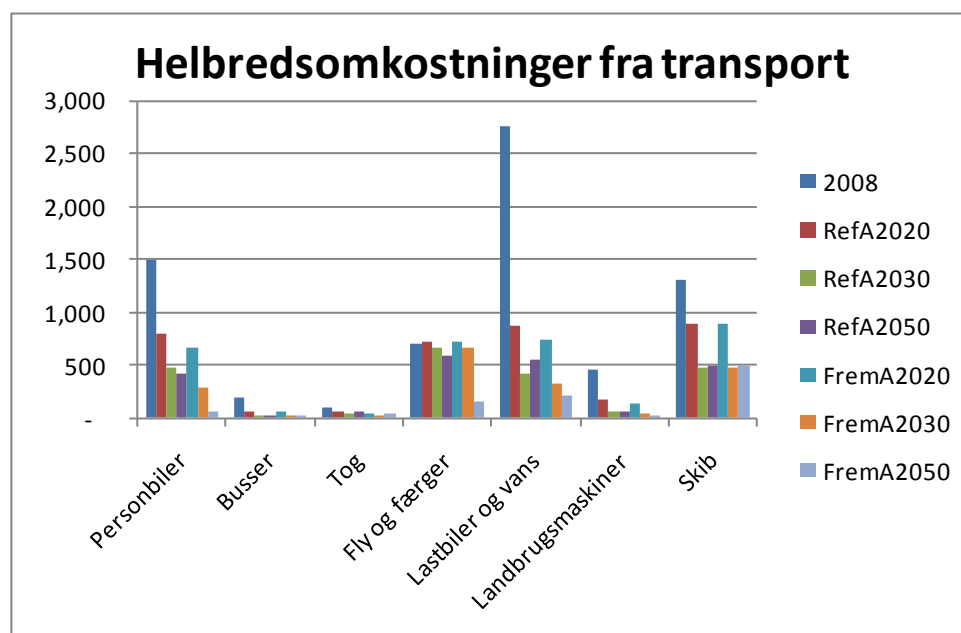
Risø DTU og Ea Energianalyse. 2010b. [Baggrundsnotat om referenceforløb U og fremtidsforløb U. Uambitiøst fremtidsforløb med mulighed for nettoimport af biomasse.](#)

## Appendiks – helbredsomkostninger fordelt på forskellige sektorer og teknologier

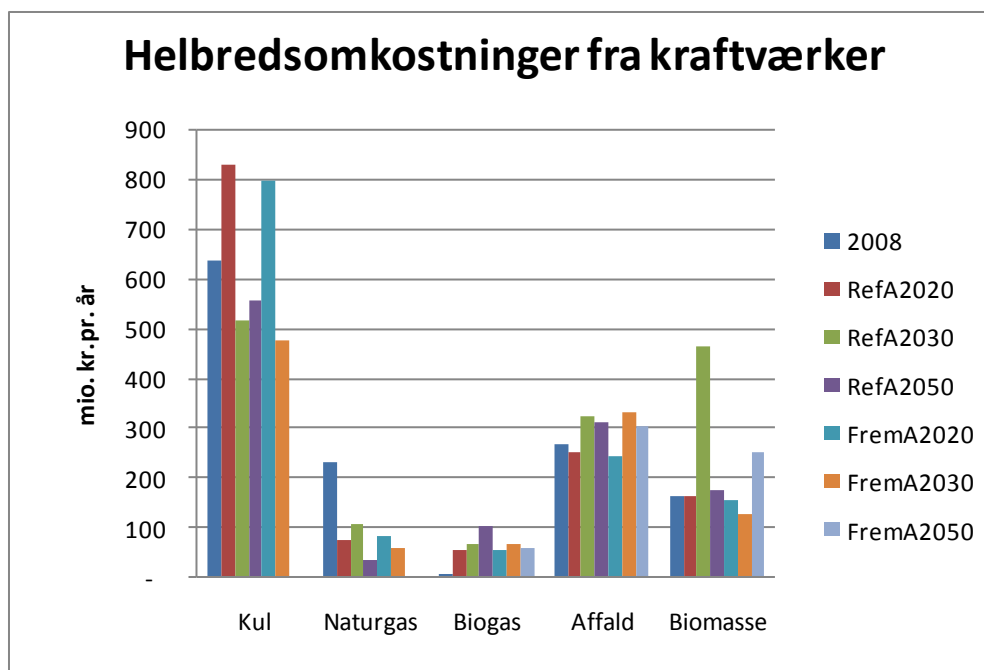
### Resultater fra Klimakommissionens Forløb A



Figur 14: Helbredsomkostninger tilknyttet udledning fra individuelle og industrielle kedler (Ind.) samt fra fjernvarmekedler (FV). RefA henviser til referenceforløb A og FremA til fremtidsforløb A.

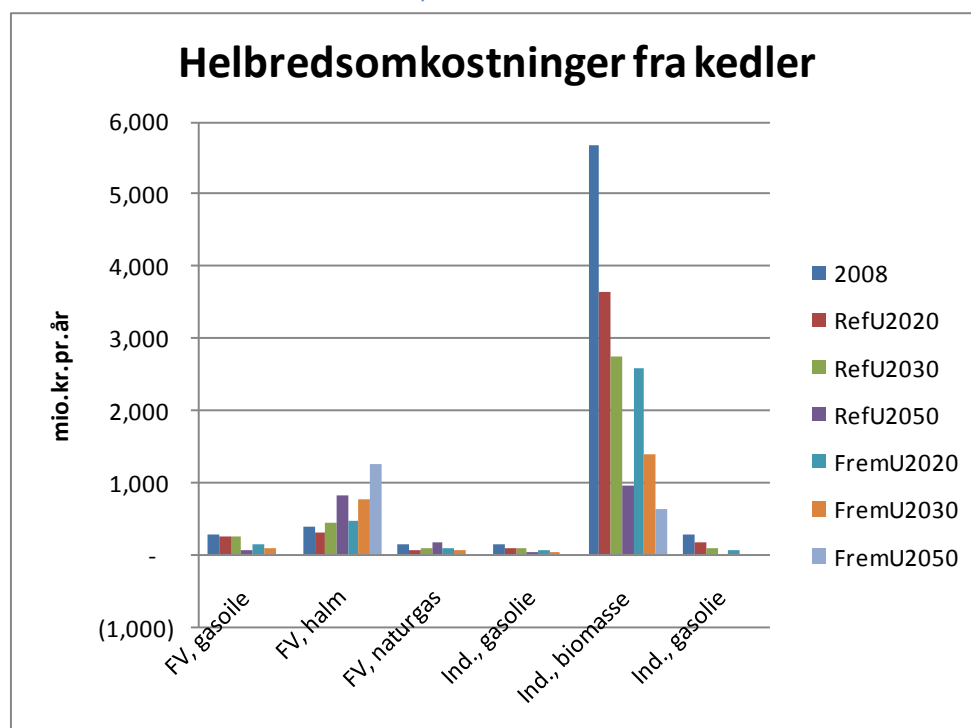


Figur 15: Helbredsomkostninger tilknyttet transport. RefA henviser til referenceforløb A og FremA til fremtidsforløb A.

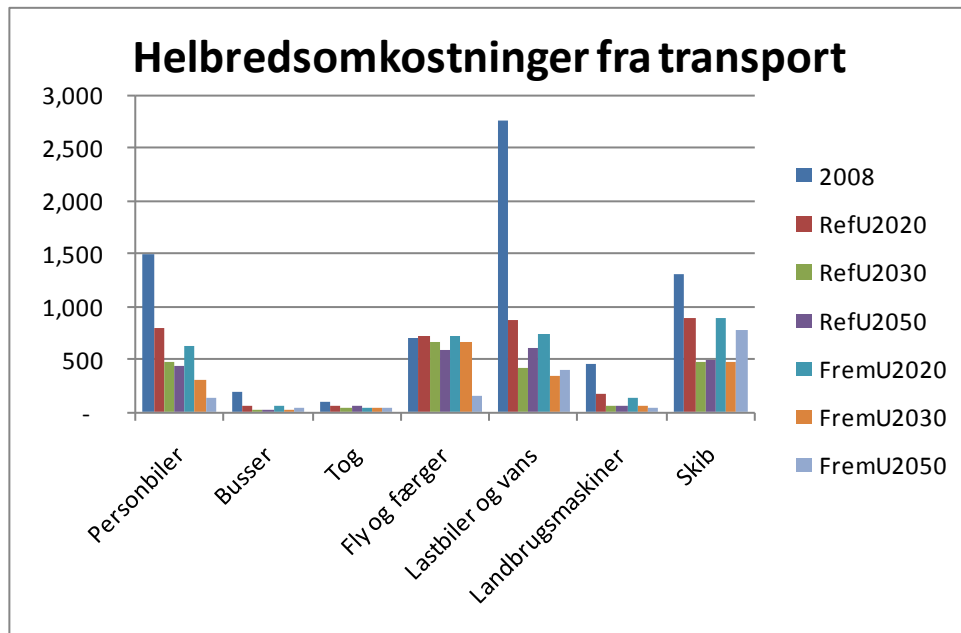


Figur 16: Helbredsomkostninger tilknyttet luftforurening fra kraftværker. RefA henviser til referenceforløb A og FremA til fremtidsforløb A.

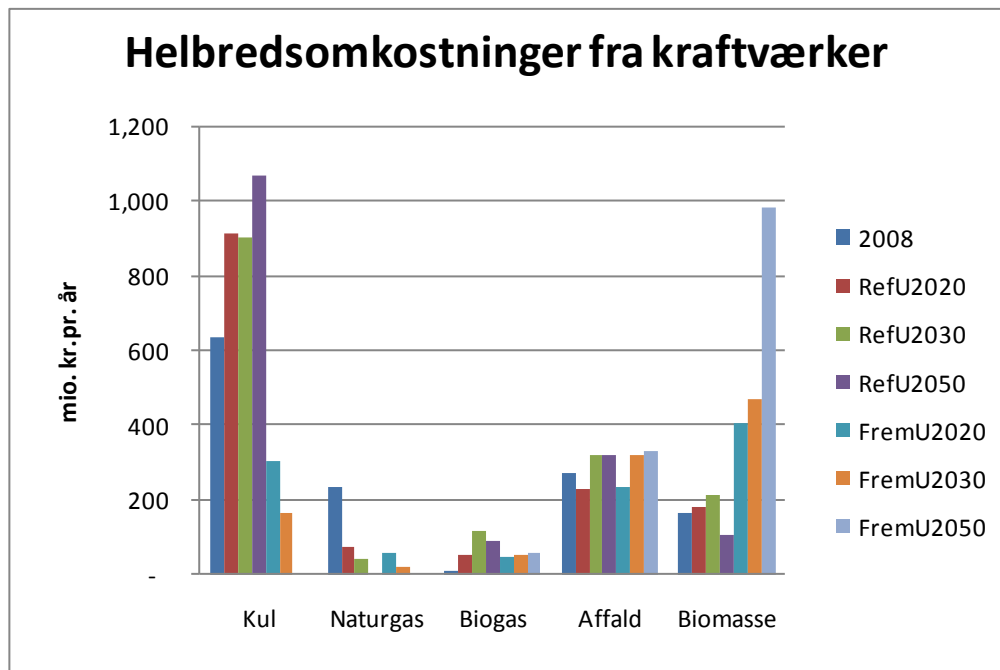
## Resultater fra Klimakommissionens Forløb U



Figur 17: Helbredsomkostninger tilknyttet udledning fra individuelle og industrielle kedler. (Ind.) samt fra fjernvarmekedler (FV). RefU henviser til referenceforløb U og FremU til fremtidsforløb U.



Figur 18: Helbredsomkostninger tilknyttet transport. RefU henviser til referenceforløb U og FremU til fremtidsforløb U.



Figur 19: Helbredsomkostninger tilknyttet luftforurening fra kraftværker. RefU henviser til referenceforløb U og FremU til fremtidsforløb U.



Centre for Energy, Environment and Health rapport serie giver dokumentation, validering og videnskabelige resultater fra Centre for Energy, Environment and Health (CEEH), som er et tværfagligt samarbejde, der skal bidrage med vidensgrundlag til at optimere Danmarks fremtidige energisystemer, når der tages hensyn til både de direkte omkostninger samt de indirekte omkostninger til miljø, klima og helbred. Centeret er finansieret af Det Strategiske Forskningsråd under kontrakt nummer 2104-06-0027 og forløber fra januar 2007 til juni 2012.

I CEEH rapport serien ([http://www.cee.dk/CEEH\\_Reports](http://www.cee.dk/CEEH_Reports)) er planlagt i alt 10 rapporter:

- 1) Description of the CEEH integrated 'Energy-Environment-Health-Cost' modelling framework system
- 2) CEEH energy system scenarios
- 3) Description and validation of integration of the EVA system in CEEH.
- 4) Demonstration of the full CEEH chain – the EVA line.
- 5) Description and validation of the CEEH-HIA model
- 6) Demonstration of the full CEEH chain – the HIA line
- 7) CEEH health impact studies
  - a) Description of the CEEH health effects model - selection of concentration-response functions
  - b) Laboratory tests of toxicity of combustion particles
- 8) The final CEEH system: Methodology, design and results
- 9) Extended abstracts from International conference on Energy, Environment and Health – Held by CEEH, REBECa and CEESA
- 10) CEEH's beregninger af helbredsomkostninger fra luftforurening i klimakommissionens scenarier

**Projekt partnere:**

Niels Bohr Institutet – Københavns Universitet

Danmarks Meteorologiske Institut

Institut for Miljøvidenskab – Aarhus Universitet

Statens Institut for Folkesundhed – Syd Dansk Universitet

Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi – Danmarks Tekniske Universitet

Center for Anvendt Sundhedstjenesteforskning og Teknologivurdering - Syd Dansk Universitet

Institut for Folkesundhed – Aarhus Universitet

**Centerleder:**

Eigil Kaas

Professor i meteorologi

Niels Bohr Institutet

Juliane Mariesvej 30

Telefon: +45 35 32 05 14

Fax: +45 35 36 53 57

Email: [kaas@gfy.ku.dk](mailto:kaas@gfy.ku.dk)